



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.



Department für Geo- und Umweltwissenschaften
an der Ludwig-Maximilians-Universität München

Bachelorarbeit

Transfer der Kalibrierung von einem Strahldichtenormal auf Hyperspektralsensoren

Nicola Schneider

01.04.2013-08.07.2013

Erstprüfer: Prof. Dr. Heiner Igel (LMU)

Zweitprüfer: Karim Lenhard (DLR)

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	3
1.1	Optische Spektrometer für den solar-reflektiven Wellenlängenbereich .	3
1.2	Kalibrierung von Spektrometern	3
1.2.1	Spektrale Kalibrierung	3
1.2.2	Geometrische Kalibrierung	4
1.2.3	Radiometrische Kalibrierung	4
1.3	Calibration Home Base	5
1.3.1	Das Strahldichtenormal RASTA	5
1.3.2	Ulbrichtkugeln	6
1.3.3	HySpex-Sensoren	7
1.3.4	SVC HR-1024i	9
1.4	Transferschema	10
2	Transfer der Kalibrierung	13
2.1	Messreihe vom Strahldichtenormal auf die HySpex-Sensoren	13
2.1.1	SVC HR-1024i als Transferspektrometer	14
2.1.2	HySpex als Transferspektrometer	18
2.2	Betrachtung potentieller Unsicherheiten	18
2.2.1	Strahldichtenormal	18
2.2.2	Transferspektrometer	19
2.2.3	Messungen an der Ulbrichtkugel	19
2.3	Bestimmung der Unsicherheiten	19
2.3.1	RASTA	19
2.3.2	SVC HR-1024i	20
2.3.3	Ulbrichtkugel	23
2.3.4	Radiometer	23
2.3.5	HySpex-Sensoren	24
2.3.6	Nichtlinearität des HySpex-VNIR	24
2.4	Fehlerfortpflanzung	24
2.5	Radiometrische Empfindlichkeit mit Unsicherheiten	25
2.5.1	SVC HR-1024i als Transferspektrometer	25

2.5.2 HySpex-Sensoren als Transferspektrometer	25
3 Zusammenfassung und Ausblick	29
Literaturverzeichnis	30
Danksagung	33
Erklärung	35

Einleitung

Optische Fernerkundung Mit dem Begriff "Erdfernerkundung" bezeichnet man Verfahren zur Gewinnung von Information über die Erdoberfläche durch Sensoren [Imf13]. Die Bachelorarbeit wurde im Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), genauer in der Abteilung Experimentelle Verfahren, durchgeführt. Das IMF betreibt optische und RADAR-Fernerkundung. Der für diese Arbeit wichtige Schwerpunkt ist die optische Fernerkundung mit den flugzeuggetragenen Hyperspektralsensoren, welche räumlich und spektral hochaufgelöste optische Bilder aufnehmen. Die damit gewonnenen Daten geben zum Beispiel Aufschluss über die Eigenschaften des Bodens, der Vegetation oder eines Gewässers. Die Abteilung Experimentelle Verfahren betreibt ein optisches Labor, die Calibration Home Base, für die geometrische, spektrale und radiometrische Charakterisierung von Hyperspektralsensoren [Cal09], [Bau10].

Zielsetzung Die Kalibrierung eines Instrumentes ist die Grundvoraussetzung für eine wissenschaftliche Datennutzung und die Vergleichbarkeit der Resultate. In der Fernerkundung werden die Eigenschaften von Oberflächen oft durch das Messen von emittiertem oder reflektiertem Licht erlangt. Intensität und Polarisation des Lichtes in seiner spektralen, räumlichen und zeitlichen Verteilung sind die dafür wichtigen Messgrößen. Mit der Kalibrierung wird die Bestimmung der Geräteparameter, welche auf das Messsignal einwirken, in physikalische Einheiten vorgenommen, wie zum Beispiel Wellenlänge eines Spektralkanals, oder die Größe und Lage eines Bildpunktes im Messfeld [Koi13].

In dieser Arbeit wird auf die radiometrische Kalibrierung eingegangen. Das Ziel ist es, an Hand eines Strahldichtenormals einen Hyperspektralsensor radiometrisch zu kalibrieren und die Messunsicherheiten zu bestimmen.

Dabei können die Hyperspektralsensoren nicht direkt am Strahldichtenormal kalibriert werden, welches eine Referenz zur radiometrischen Größe der Strahldichte darstellt, da nicht das gesamte Gesichtsfeld des Sensors ausgeleuchtet werden kann. Deswegen muss ein Transfer stattfinden. Dabei werden zwei verschiedene Transferpektrometer betrachtet, und die Messungen an den DLR-eigenen Hyperspektralsensoren durchgeführt.

Um die Messunsicherheiten zu bestimmen, werden verschiedene Tests mit den einzelnen Komponenten der Messkette durchgeführt. Um zum Beispiel das Rauschen der einzelnen Sensoren zu bestimmen, werden 1000 Messungen gemacht und deren Standardabweichung bestimmt. Mit Hilfe von Fehlerfortpflanzung und den bestimmten Einzelunsicherheiten kann man Aussagen über die Gesamtunsicherheit dieser Messkette treffen.

In Kapitel 1 wird auf die Grundlagen dieser Arbeit eingegangen und es werden die einzelnen Komponenten erklärt. Kapitel 2 umfasst hingegen die Durchführung der Messkette und deren Unsicherheitsbestimmung. Abschließend erfolgt in Kapitel 3 die Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

Kapitel 1

Grundlagen

1.1 Optische Spektrometer für den solar-reflektiven Wellenlängenbereich

Im IMF wird mit flugzeuggetragenen optischen Spektrometern gearbeitet. Beim Überfliegen eines Gebietes dienen die optischen Spektrometer zur Messung des am Boden reflektierten Lichtes. Die dadurch gewonnenen Daten geben Aufschluss über die Bodenbeschaffenheit.

Hyperspektralsensoren sind optisch abbildende Spektrometer, die in dem optischen Spektralbereich von Ultraviolett bis kurzwelligen Infrarot arbeiten. Das Wort "hyperspektral" steht für die Eigenschaft, mit Hilfe von vielen Kanälen Strahldichten mit hoher spektraler Auflösung messen zu können. Bildgebende Hyperspektralsysteme sind passive Systeme, d.h. sie senden kein Signal aus [Bau10].

Die in dieser Arbeit verwendeten HySpex-Sensoren werden kommerziell von der Firma NEO hergestellt. Für jedes Pixel in einem Bild messen die HySpex-Sensoren die Strahldichte für ein breites kontinuierliches Spektrum. Auf diese Weise können die Objekte im Bild durch ihr charakteristisches Spektrum sehr detailliert erforscht werden [Nor08] [Nor10].

1.2 Kalibrierung von Spektrometern

1.2.1 Spektrale Kalibrierung

Unter spektraler Kalibrierung versteht man die Bestimmung und Verwendung der spektralen Antwortfunktion (Englisch: Spectral Response Function, SRF). Diese beschreibt die Empfindlichkeit eines Spektralkanals in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einstrahlenden Lichts. Die SRF ist eine Funktion vom optischen System

und dem Sensor-Chip und kann oft durch eine Gauß-Funktion beschrieben werden. Die Halbwertsbreite der Gauß-Kurve (siehe Abb. 1.1) ist ein Maß für die spektrale Auflösung, die Peak-Position entspricht der zentralen Wellenlänge eines Kanals. Der Abstand einzelner Peaks zeigt das Abtastintervall an [Bau10].

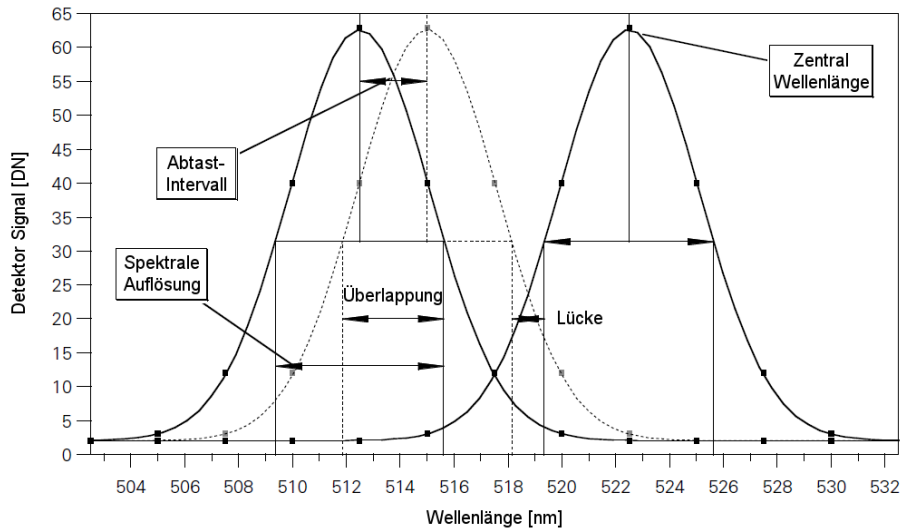


Abbildung 1.1: Spektrale Auflösung, spektrales Abtast-Intervall, Zentralwellenlänge am Beispiel einer gaußschen Antwortfunktion [Bau10]

1.2.2 Geometrische Kalibrierung

Die geometrische Kalibrierung wird mit der Linienspreizfunktion (Englisch: Line Spread Function) beschrieben, welche wiederum häufig mit einer Gauß-Funktion angenähert werden kann. Diese beschreibt die Empfindlichkeit eines Detektorelements gegenüber Licht als Funktion des Einfallswinkels. Die Maximumposition gibt den Blickwinkel an. Die Halbwertsbreite ist das geometrische Auflösungsvermögen eines Pixels [Bau10].

1.2.3 Radiometrische Kalibrierung

Die quantitative Messung von elektromagnetischer Strahlung wird Radiometrie genannt. Die für diese Arbeit relevante Größe ist die spektrale Strahldichte. Das Ziel der radiometrischen Kalibrierung ist die Überführung des Sensorsignal in der Sensoreinheit (digital numbers, DN) zur physikalischen Größe der Strahldichte [Rel97].

1.3 Calibration Home Base

Mit der Calibration Home Base (CHB) wurde ein optisches Labor geschaffen, in dem flugzeuggetragene abbildende Spektrometer radiometrisch, geometrisch und spektral kalibriert werden können. Im folgendem werden die in dieser Arbeit verwendeten Apparaturen beschrieben.

1.3.1 Das Strahldichtenormal RASTA

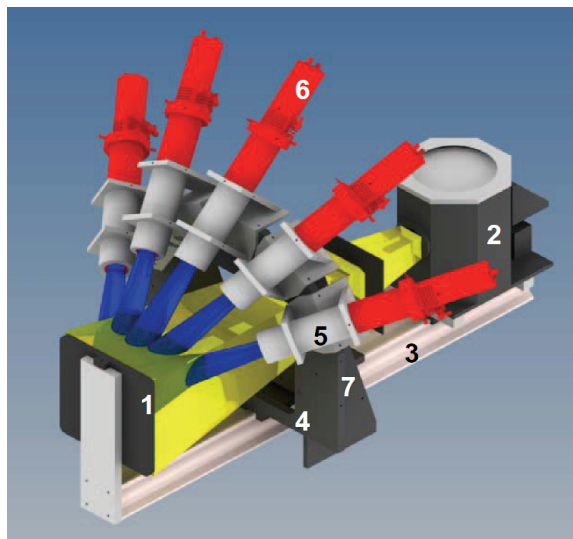


Abbildung 1.2: RASTA-Aufbau: (1) Reflexionsstandard, (2) Lampengehäuse, (3) Schiene, (4) Befestigungsadapter für Messgeräte, (5) Befestigungsadapter für Radiometer, (6) Radiometer, (7) Montageplatz für zusätzliche Sensoren, Blau: Gesichtsfeld der Radiometer [Sch12]

Für die Kalibrierung wurde das RASTA (Abkürzung für: RAdiometric STAn-dard) als Strahldichtenormal verwendet, dessen Aufbau in Abbildung 1.2 zu sehen ist. Die Lampe, das Spektralon und der komplette Aufbau wurden separat durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) kalibriert. Die von der PTB gemessene Strahldichtekurve ist in Abbildung 1.3 zu sehen. Als Lichtquelle dient eine 1000 W Wolfram-Halogenlampe, welche zusammen mit dem von ihr bestrahlten Reflexionsstandard, auch Spektralon genannt, als Strahldichtestandard verwendet wird [Con10]. Das Spektralon besteht aus gesintertem Polytetrafluorethylen, welches einen hohen, gleichmäßigen und kaum winkelabhängigen Reflexionsgrad im genutzten Spektralbereich aufweist. Vor dem Reflexionsstandard wurde ein Befestigungsadapter für weitere Messgeräte montiert. Mit dessen Hilfe kann man bis zu sieben Instrumente in einem

Halbkreis um die optische Achse anordnen. Dadurch können alle Instrumente denselben Punkt, mit derselben Distanz und demselben definierten Winkel von 45° messen und somit Abweichungen in der Strahldichte durch räumliche Inhomogenität vermeiden. Fünf der sieben Plätze werden für die Radiometer benutzt, welche die Stabilität des Systems überwachen. Diese Radiometer decken einen Wellenlängenbereich von $350 - 2500 \text{ nm}$ ab und haben sehr stabile Detektoren von der Firma Gamma Scientific in Zusammenarbeit mit NIST. Die in dieser Arbeit verwendeten Radiometer haben Siliziumdetektoren, von denen einige mit Bandpassfiltern versehen sind.

Die beiden seitlich angebrachten Plätze können für weitere Sensoren genutzt werden, welche jedoch vorher spektral und geometrisch kalibriert werden sollten. Größere Geräte können zu beiden Seiten der Schiene platziert werden [Sch12].

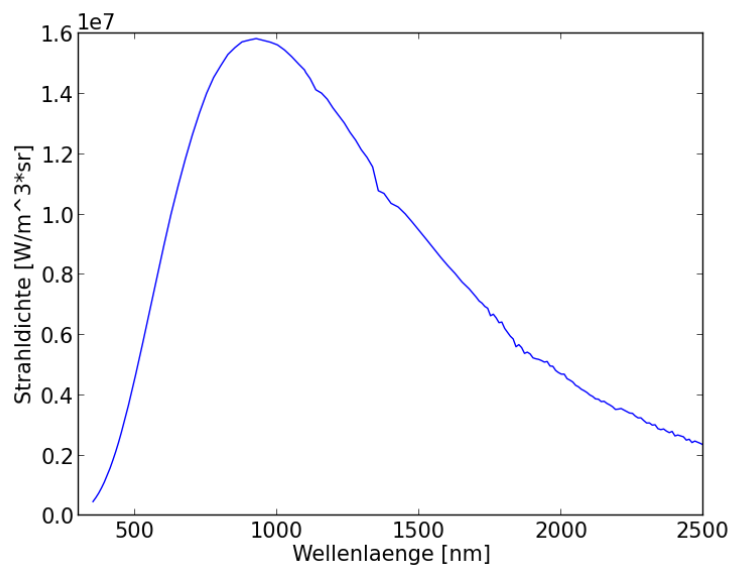


Abbildung 1.3: Strahldichtevertelung vom RASTA, bestimmt durch PTB

1.3.2 Ulbrichtkugeln

Eine Ulbrichtkugel wird als homogene, weiße Lichtquelle verwendet. In der CHB gibt es zwei Ulbrichtkugeln (siehe Abbildung 1.4). In der Bachelorarbeit wurde die große Ulbrichtkugel, mit einem Durchmesser von $1,65 \text{ m}$ als Lichtquelle eingesetzt, um eine relative radiometrische Kalibrierung durchzuführen. Sie wird im Inneren von 18 stabilisierten Halogenlampen beleuchtet und stellt eine homogene Strahldichte auf einer Fläche von $55 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}$ bereit. Das Licht der Lampen der Ulbrichtkugel wird diffus an den reflektierenden weißen Hohlkugelflächen mehrfach reflektiert.

Nachdem sie durch das Strahldichtenormal RASTA mit Hilfe eines Transferspektrometers kalibriert ist, wird sie als "neues" Strahldichtenormal verwendet. Um Intensitätsschwankungen vor allem zu Beginn und über längere Messzeiträume festzustellen, wurden Radiometer verwendet. Vor Beginn der Messungen an der Ulbrichtkugel muss diese erst mindestens 30 min warm werden.

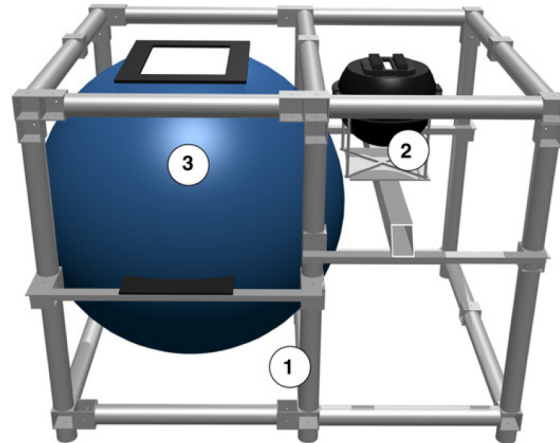


Abbildung 1.4: Aufbau von radiometrischen Messungen: (1) Rahmen, (2) kleine Ulbrichtkugel, (3) große Ulbrichtkugel

1.3.3 HySpex-Sensoren

Seit Anfang 2012 ist das DLR im Besitz eines HySpex VNIR-1600 (Visible and Near-Infrared, dt.: sichtbares und nahes Infrarot) und eines HySpex SWIR-320m-e (Short Wave INfrared, dt.: kurzwelliges Infrarot) (siehe Abbildung 1.5), welche schon in mehreren Flugzeugkampagnen zum Einsatz kamen. In der Tabelle 1.1 werden die Eigenschaften dieser Geräte dargestellt.

Tabelle 1.1: Eigenschaften des HySpex-Sensoren [Nor10]

	VNIR-1600	SWIR-320m-e
Spektraler Bereich	410 – 1000 nm	1000 – 2500 nm
Räumliche Pixel	1600	320
Kanäle	160	256
Gesichtsfeld	17 °	14 °
Digitalisierung	12 bit	14 bit

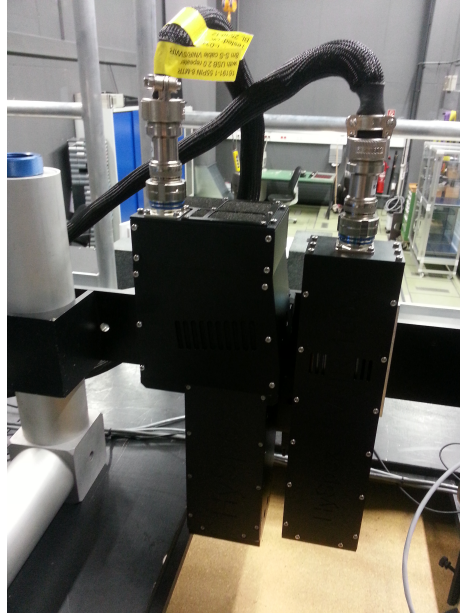


Abbildung 1.5: HySpex SWIR-320m-e (links), HySpex VNIR-1600 (rechts)

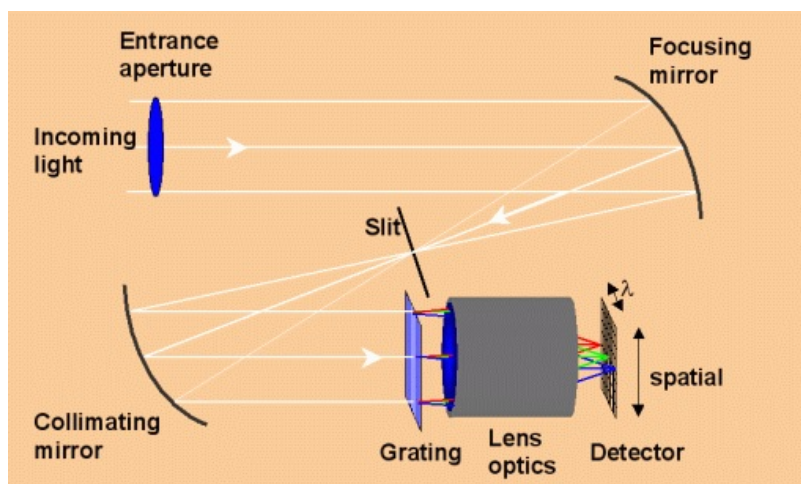


Abbildung 1.6: Funktionweise des HySpex [Nor08]

Funktionsweise der HySpex-Sensoren Die HySpex-Sensoren arbeiten nach dem sogenannten pushbroom Prinzip. Darunter versteht man die zeilenweise Abtastung eines Objektes. In jedem Abtastschritt wird eine dünne Linie in der Objektebene durch die Kamera abgetastet und vor Erreichen des Detektorarrays in ihre spektralen Komponenten zerlegt. Eine Achsenrichtung des aufnehmenden 2D Arrays stellt die räumlichen Pixel, die andere die spektralen Kanäle dar.

Wie in Abb. 1.6 zu sehen ist, arbeitet die Kamera intern wie folgt: Die Voro-optik bildet die Szene auf einen Spalt ab, welcher das Licht nur auf einer schmalen Linie durchlässt. Nach einem Kollimatorspiegel sorgt ein Transmissionsgitter für eine spektrale Zerlegung der einfallenden Strahlung. Das Spektrum wird auf ein zweidimensionales Detektorarray abgebildet. Die meisten modernen Hyperspektralsensoren arbeiten analog. Der HySpex-VNIR misst vor jeder Messung den Dunkelstrom, der HySpex-SWIR vor und nach jeder Messung. Die Dunkelmessung wird separat abgespeichert und wird vor der weiteren Verarbeitung abgezogen. Auf Grund einer Nichtlinearität der HySpex-Sensoren bei Signalen kleiner 300 DN gibt es in diesen Bereichen größere Unsicherheiten. In dieser Arbeit agieren die HySpex-Sensoren sowohl als Transferspektrometer als auch als zu kalibrierende Geräte.

1.3.4 SVC HR-1024i



Abbildung 1.7: SVC HR-1024i

Neben den HySpex-Sensoren wird auch das Laborspektrometer SVC HR-1024i für den Transfer der Kalibrierung der Ulbrichtkugel mithilfe vom Strahldichtenormal

verwendet. Das SVC HR-1024i (siehe Abbildung 1.7) ist von der Firma Spectra Vista Corporation entwickelt worden. Es arbeitet im ultravioletten, sichtbaren und im kurzwelligen, infraroten Bereich bei Wellenlängen von 350 nm bis 2500 nm [SVC12]. Es ist in drei Detektorbereiche aufgeteilt. Da diese sich etwas überlappen, werden sie für die Berechnungen in folgende Bereiche aufgeteilt: Der erste Bereich geht circa von 350 nm - 973 nm, der zweite von 973 nm - 1910 nm und der letzte von 1910 nm - 2500 nm. Im Gegensatz zu den HySpex-Sensoren ist das SVC HR-1024i kein abbildendes Spektrometer: Es misst nur das Spektrum eines einzelnen Pixels. Als Voroptik kann man sowohl Linsen also auch ein Glasfaserbündel benutzen. Das SVC HR-1024i misst automatisch vor jeder Messung den Dunkelstrom und berücksichtigt diesen bei den Messwerten. Es wurden immer nur die Rohdaten in DN gemessen, um nicht die Kalibrierung des Herstellers zu übernehmen. Alle Messungen wurden bei ausgeschalteter Raumbeleuchtung durchgeführt.

1.4 Transferschema

Das radiometrische Kalibrierschema wird in Abbildung 1.8 dargestellt wird.

In diesem Fall wird das RASTA als Strahldichtestandard verwendet. Am einfachsten wäre es, wenn man die Sensoren direkt am RASTA kalibrieren könnte, doch da es sich um flugzeuggetragene Systeme handelt, haben sie ein zu großes Gesichtsfeld und können aus diesem Grund nicht komplett am RASTA ausgeleuchtet werden. Daher wird als Zwischenschritt die Ulbrichtkugel eingeführt, welche zuerst durch ein Transferspektrometer kalibriert werden muss und dann als neuer Kalibrierstandard zur Verfügung steht. In dieser Arbeit wurden das SVC HR-1024i und die HySpex-Sensoren als Transferspektrometer verwendet. Bei den HySpex-Sensoren wurde für die Kalibrierung der Ulbrichtkugel ein mittleres Pixel verwendet. Ist so die spektrale Strahldichte der Ulbrichtkugel bestimmt, kann man die HySpex-Sensoren daran kalibrieren. Der Vorteil von den HySpex-Sensoren als Transferspektrometer ist, dass sie gleichzeitig die zu kalibrierenden Geräte sind. Allerdings kann man den Transfer mit dem SVC HR-1024i nicht vernachlässigen, da es andere zu kalibrierende Hyperspektralsensoren in der CHB gibt, welche nicht wie die HySpex-Sensoren, selbst als Transferspektrometer dienen können. Ein Beispiel dafür ist der APEX-Sensor [APE13], da dieser zu groß und zu schwer ist, um am RASTA kalibriert zu werden.

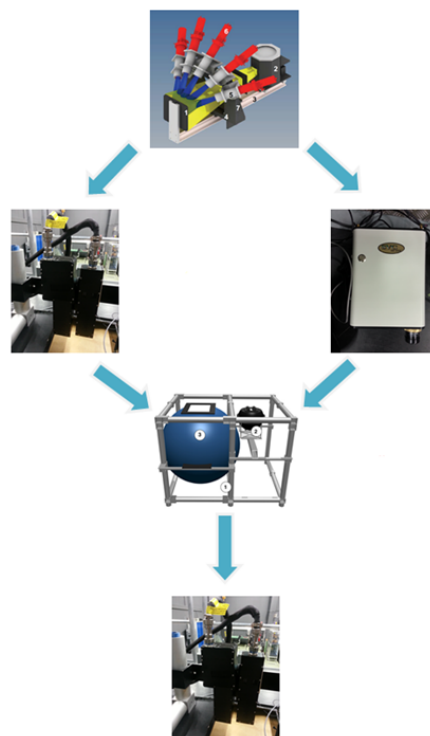
Funktion

Kalibrierte
Lichtquelle

Transfer-
spektrometer

Unkalibrierte
Lichtquelle

Zu kalibrierendes
Messsystem



Geräte

RASTA

HySpex-Sensoren (li)
SVC HR 1024i (re)

Ulbrichtkugel

HySpex-Sensoren

Abbildung 1.8: Transfermethoden

Kapitel 2

Transfer der Kalibrierung

2.1 Messreihe vom Strahldichtenormal auf die HySpex-Sensoren

Um die radiometrische Empfindlichkeit zu bestimmen, müssen mehrere Teilschritte durchgeführt werden. Das RASTA wird als Strahldichtestandard verwendet. Als Transferspektrometer können das SVC HR-1024i oder die HySpex-Sensoren selbst dienen. In dieser Arbeit steht c immer für die radiometrische Empfindlichkeit, L für die spektrale Strahldichte und t für die Integrationszeit. Die Indizes i und j stehen für die spektralen Kanäle und räumlichen Pixel.

Tabelle 2.1: Durchgeführte Messreihe mit den dadurch erlangten Ergebnissen

Messung	Ergebnis
RASTA + Transferspektrometer	c_i (Transferspektrometer)
Transferspektrometer + Ulbrichtkugel	L_{UK}
Ulbrichtkugel + HySpex-Sensoren	$c_{i,j}$ (HySpex-Sensoren)

Die Größen aus Tabelle 2.1 sind über eine Gleichung verknüpft:

$$c(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{L(\lambda) \cdot t} \quad . \quad (2.1)$$

Mit $c(\lambda)$ als radiometrische Empfindlichkeit, $L(\lambda)$ als spektrale Strahldichte, t als Integrationszeit und $S(\lambda)$ als Signal.

2.1.1 SVC HR-1024i als Transferspektrometer

SVC HR-1024i am Strahldichtenormal

Messaufbau Im ersten Schritt misst man mit dem SVC HR-1024i am RASTA. Dafür wird das SVC HR-1024i im Winkel von 45° zum Spektralnormal montiert. Vor Beginn muss die Lampe des RASTA mindestens eine halbe Stunde warm werden. Das SVC HR-1024i misst die vom Spektralnormal reflektierte spektrale Strahldichte. Das dadurch entstehende Spektrum für ein Pixel ist in Abbildung 2.1.1 zu sehen.

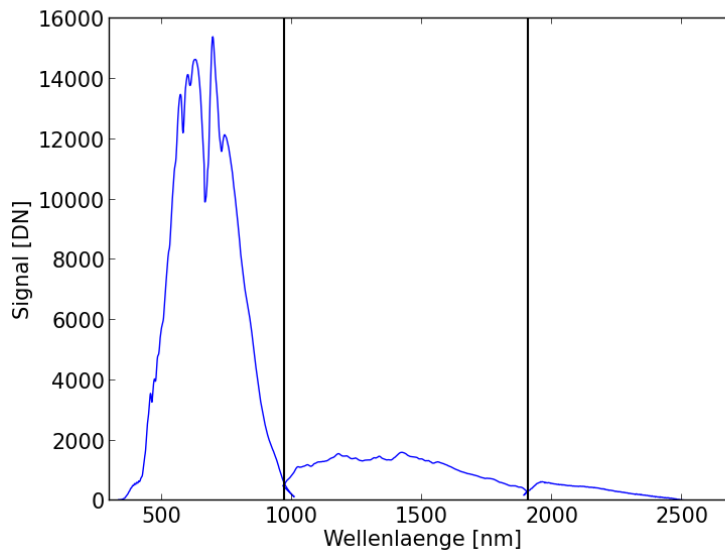


Abbildung 2.1: SVC HR-1024i Signal am Strahldichtenormal. Die senkrechten Striche sind, wie in allen folgenden Abbildungen, die Detektorübergänge, welche das Signal in die drei Detektorbereiche aufteilen.

Messergebnis Mit der Gleichung (2.1) kann man nun die radiometrische Empfindlichkeit für das SVC HR-1024i berechnen. Und zwar wie folgt:

$$c_{\text{svc},i} = \frac{S_{\text{svc},r}}{L_{\text{PTB}} \cdot t_{\text{svc}}} \quad . \quad (2.2)$$

Mit c_{svc} als zu bestimmende radiometrische Empfindlichkeit des SVC HR-1024i, $S_{\text{svc},r}$ als das gemessene Signal des SVC HR-1024i am RASTA, L_{PTB} als die von der PTB angegebenen Strahldichte des RASTA und t als Integrationszeit des SVC HR-1024i.

SVC-HR 1024i an der Ulbrichtkugel

Messaufbau Nachdem man die radiometrische Empfindlichkeit des SVC HR-1024i an dem RASTA gemessen hat, kann man damit die spektrale Strahldichte der Ulbrichtkugel bestimmen. Dafür wurde die Faser des SVC HR-1024i über die Öffnung der großen Ulbrichtkugel gehalten. Bei der Ulbrichtkugel wird die hellste Einstellung (Lampenkombination 12) ausgewählt. Um die Stabilität der Ulbrichtkugel zu überprüfen, wurde parallel mit einem Silizium-Filterradiometer gemessen, welche nicht mit einem optischen Filter versehen sind (siehe Absatz 1.3.1).

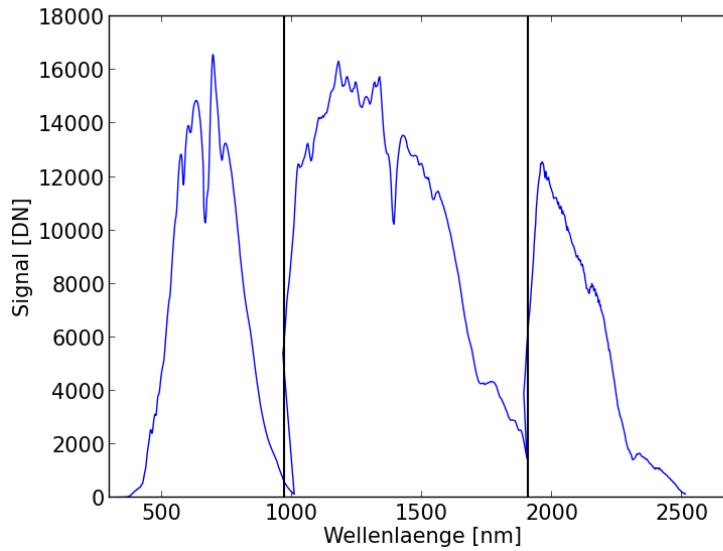


Abbildung 2.2: SVC HR-1024i -Signal an der Ulbrichtkugel

Messergebnis Das vom SVC HR-1024i gemessene Signal ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Zum Berechnen der Strahldichte wurde die Gleichung 2.2 umgestellt:

$$L_{UK}(\lambda) = \frac{S_{svc_uk,j}}{c_{svc,i} \cdot t_{svc}} . \quad (2.3)$$

Mit $L_{UK}(\lambda)$ als zu messende Strahldichte der Ulbrichtkugel, $c_{svc,i}$ als radiometrische Empfindlichkeit des SVC HR-1024i, $S_{svc_uk,j}$ als gemessene Signal des SVC HR-1024i an der Ulbrichtkugel und t als Integrationszeit des SVC HR-1024i.

Die Intensitätsunterschiede im zweiten und dritten Detektorbereich in den Abbildungen 2.1.1 und 2.2 entstehen durch die Belichtungsautomatik des SVC HR-1024i an dem RASTA und an der Ulbrichtkugel, beziehungsweise durch die unterschiedlichen Lampen und Geometrie der beiden Strahldichtequellen.

Die Filtrerradiometermessung der Ulbrichtkugel ergab, dass die Lichtquelle während der Messung stabil ist.

HySpex an der Ulbrichtkugel

Messaufbau Im letzten Schritt werden die HySpex-Sensoren über der Ulbrichtkugel montiert. In Abbildung 2.3 ist der Messaufbau dargestellt. Die beiden HySpex-Sensoren wurden über der Ulbrichtkugel montiert. Zur Überprüfung der Stabilität der Ulbrichtkugel wurde erneut das Silizium-Filtrerradiometer ohne Farbfilter verwendet. Für die Messung wurde die hellbraune Schutzabdeckung über der Ulbrichtkugel (siehe Abbildung 2.3 Nummer (5)) entfernt. Es wurde mit der Lampenkombination 12 gemessen.

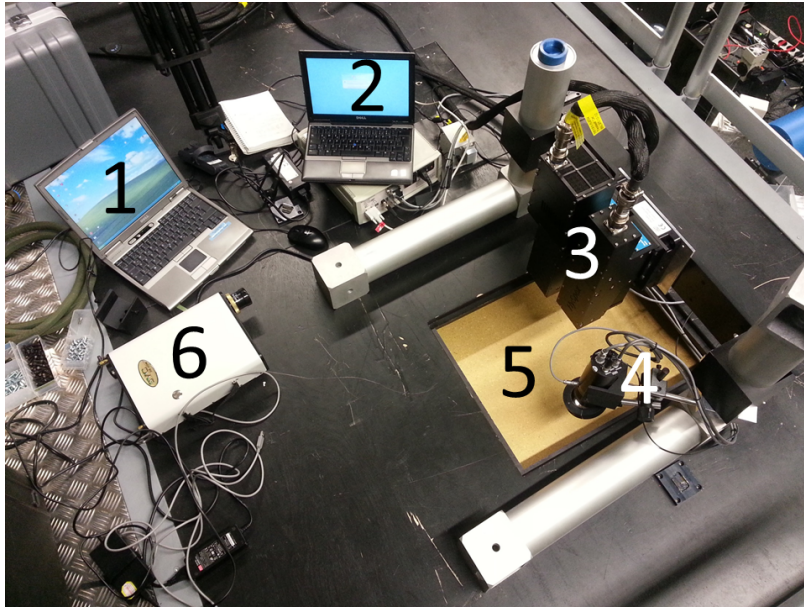


Abbildung 2.3: Messaufbau: HySpex-Sensoren über Ulbrichtkugel: (1)&(2) Steuer- und Auswertungs-PCs, (3) HySpex-Sensoren, (4) Radiometer, (5) Öffnung der Ulbrichtkugel, (6) SVC HR-1024i

Messergebnis Nun wird wieder die Gleichung (2.1) verwendet.

$$c_{HS,i,j} = \frac{S_{HS,i,j}}{L_{UK}(\lambda) \cdot t_{HS}} \quad . \quad (2.4)$$

Mit $c_{HS,i,j}$ als zu messende radiometrische Empfindlichkeit der HySpex-Sensoren, $S_{HS,i,j}$ als das gemessene Signal der HySpex-Sensoren an der Ulbrichtkugel, L_{UK} als Strahldichte der Ulbrichtkugel siehe Gleichung (2.3), t als Integrationszeit der

2.1. MESSREIHE VOM STRAHLDICHTENORMAL AUF DIE HYSPEX-SENSOREN17

HySpex-Sensoren.

Damit ist die Messreihe vom Strahldichtenormal, über das Transferspektrometer und die Ulbrichtkugel auf die HySpex-Sensoren komplett. Die somit berechnete radiometrische Empfindlichkeit der verschiedenen Pixel des HySpex-VNIR in Bezug auf die Wellenlänge werden in der Abbildungen 2.4 dargestellt. Es wurden drei verschiedene Pixel ausgewählt und dargestellt. Die unterschiedliche Höhe der einzelnen Kurve ergibt sich durch die relativen radiometrischen Eigenschaften vom Sensor. In der Abbildungen 2.5 wird die normierte Abweichung in Abhängigkeit des Pixels und Kanals dargestellt. Bei dem HySpex-SWIR kam es zu bisher ungeklärten Fehlern. Daher muss diese Transferkette in der Zukunft wiederholt werden.

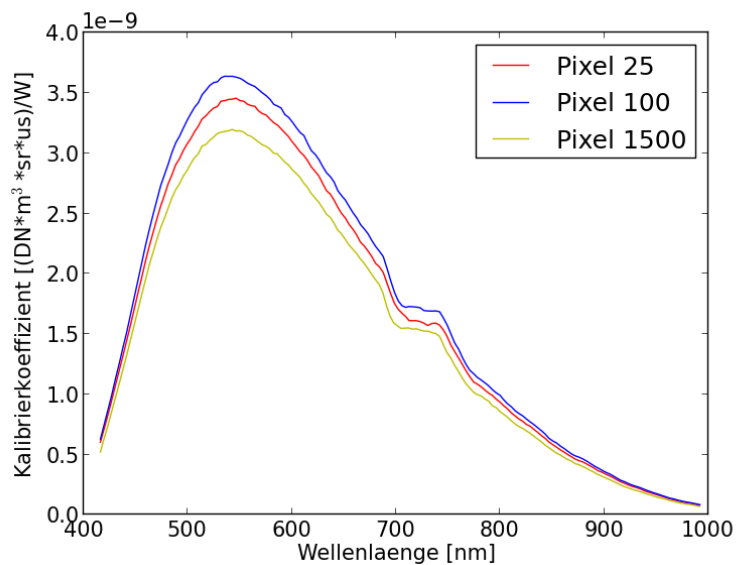


Abbildung 2.4: Radiometrische Empfindlichkeit des HySpex-VNIR

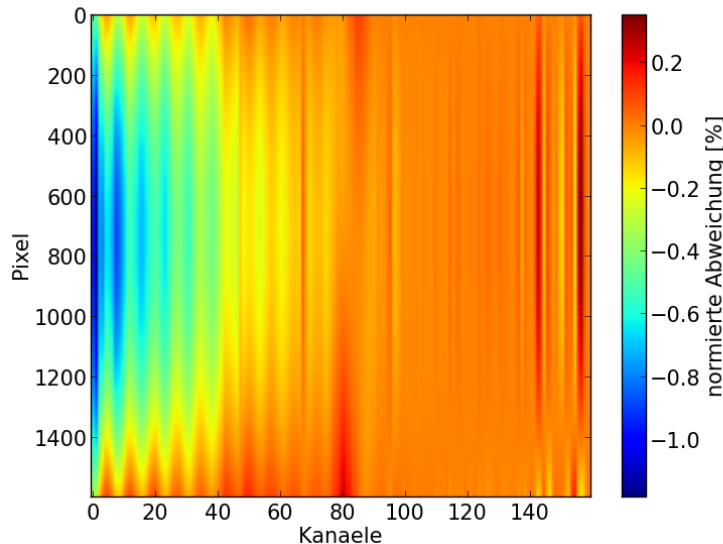


Abbildung 2.5: HySpex-VNIR: Normierte Abweichung der radiometrischen Empfindlichkeit in Abhängigkeit von Kanal und Pixel

2.1.2 HySpex als Transferspektrometer

Neben dem SVC HR-1024i kann man, wie schon erwähnt, auch die HySpex-Sensoren als Transferspektrometer verwenden. Der Messablauf bleibt dabei der Gleiche. Bei dem HySpex-VNIR wurde das 800. Pixel und beim HySpex-SWIR das 160. Pixel zum Transfer verwendet, da diese die Winkelbedingungen von 45° erfüllen und ausgeleuchtet werden können (siehe Abschnitt 1.3.1).

2.2 Betrachtung potentieller Unsicherheiten

Wie bei der Messung ist auch diese mit einer Messunsicherheit behaftet, welche in unterschiedlichen Experimenten näher betrachtet wurde. Im Folgenden wird auf die verschiedenen potentiellen Unsicherheiten eingegangen. Im darauf folgenden Abschnitt werden die Messungen zu den potentiellen Unsicherheiten dargestellt.

2.2.1 Strahldichtenormal

Da das RASTA von der PTB kalibriert wurde, liegen die Unsicherheiten der Strahldichte bereits vor. In diesem Bericht wird auf die Unsicherheiten in Abhängigkeit von der Abweichung des optimalen Winkel von 45° eingegangen [PTB11]. Mit Hilfe von Radiometern wurde die Stabilität der Lampe gemessen.

2.2.2 Transferspektrometer

Wie schon in Abschnitt 2.1.2 erwähnt kann man sowohl das SVC HR-1024i, als auch das HySpex als Transferspektrometer hernehmen. Die spektrale Kalibrierung wurde bei beiden Geräten vom jeweiligen Hersteller durchgeführt. Die radiometrische Kalibrierung wurde im Rahmen dieser Arbeit bestimmt. Des Weiteren wurde das Rauschen der beiden Transferspektrometer überprüft. Neben der Kalibrierung ist auch deren Stabilität wichtig. Bei dem HySpex-VNIR gibt es, laut dem Hersteller [ADI13] für Signale kleiner 300 DN eine Nichtlinearität.

2.2.3 Messungen an der Ulbrichtkugel

Die Inhomogenität der Ulbrichtkugel wurde bereits in einer Messung bestimmt [Bau13]. In dieser Arbeit wurde außerdem noch auf zeitliche Schwankungen und die Signaländerung in Abhängigkeit vom Blickwinkel eingegangen.

2.3 Bestimmung der Unsicherheiten

Im Folgenden werden die zugehörigen Messungen erläutert.

2.3.1 RASTA

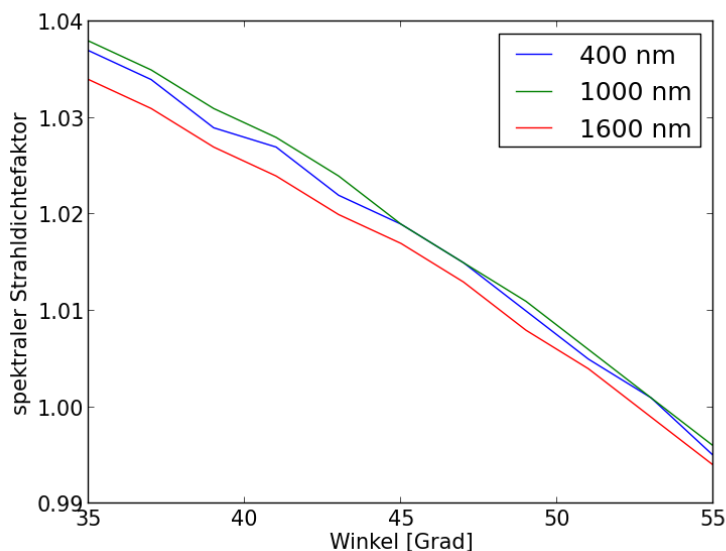


Abbildung 2.6: Winkelabhängigkeit der Strahldichte des RASTA

Das Strahldichtenormal RASTA wurde, wie schon erwähnt, von der PTB kalibriert [PTB11]. Die Strahldichte ist also mit den PTB-Unsicherheiten bekannt. Man kann die errechnete Messunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor (Englisch: coverage factor) $k > 1$ multiplizieren um den Vertrauensbereich zu erhöhen [Unc01]. Die Unsicherheiten zu den Strahldichten wurden von der PTB mit $k = 2$ angegeben. Nachdem in dieser Arbeit bei der Unsicherheit mit $k = 1$ gerechnet wird, werden die angegebenen Werte halbiert.

Zusätzlich wurde betrachtet in wie weit sich die Werte verändern, wenn man nicht mit genau 45° auf das Spektralon blickt. Der 45° Winkel kommt daher, dass die PTB bei diesem kalibriert hat. Statt der Strahldichte wurden diese Werte mit dem spektralen Strahldichtefaktor angegeben, welcher direkt proportional zur Strahldichte ist. In dieser Messung wurden die Wellenlängen 400, 1000, 1600 nm betrachtet. Auch diese Wellenlängen sind von der PTB vorgegeben, da sie bei diesen den Strahldichtefaktor überprüft hat.

In der Abbildung 2.6 erkennt man, dass sich die Werte um rund $0,5\%/^\circ$ unterscheiden. Dies stellt eine Abweichung vom Idealfall da, in welchem der Strahldichtefaktor konstant sein würde.

2.3.2 SVC HR-1024i

Spektrale Kalibrierung des SVC HR-1024i

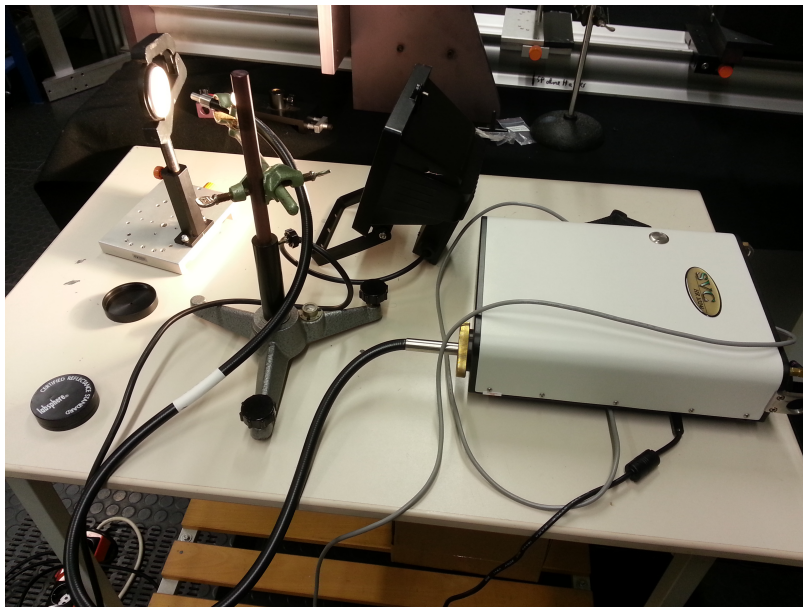


Abbildung 2.7: Messaufbau: dotiertes Spektralon (links), Baustellenlampe (mitte), SVC HR-1024i (rechts)

Messaufbau Die ursprüngliche Kalibrierung kommt vom SVC HR-1024i. Um zu prüfen, ob es beim SVC HR-1024i Änderungen mit Abstand, Winkel, Temperatur, Zeit oder Transport bzgl. der Zuordnung der Zentralwellenlängen zu den Kanälen gibt, wurde ein dotiertes Spektralon verwendet, siehe Abbildung 2.7. Dieses enthält seltene Erden und hat daher ein sehr charakteristisches, "zackenreiches" Spektrum, wie in Abbildung 2.8 zu sehen ist. Die Zentren der Peaks im Reflexionsspektrum, welches durch das SVC HR-1024i gemessen wird, werden bestimmt, indem Gaußfunktionen an entsprechende Ausschnitte angepasst werden. Die Zentren der angepassten Funktion entsprechen dann den Maxima der Peaks. Diese wurden jeweils mit einem höher aufgelösten Referenzspektrum verglichen. Dadurch kann man Rückschlüsse auf eventuelle Wellenlängenänderungen ziehen.

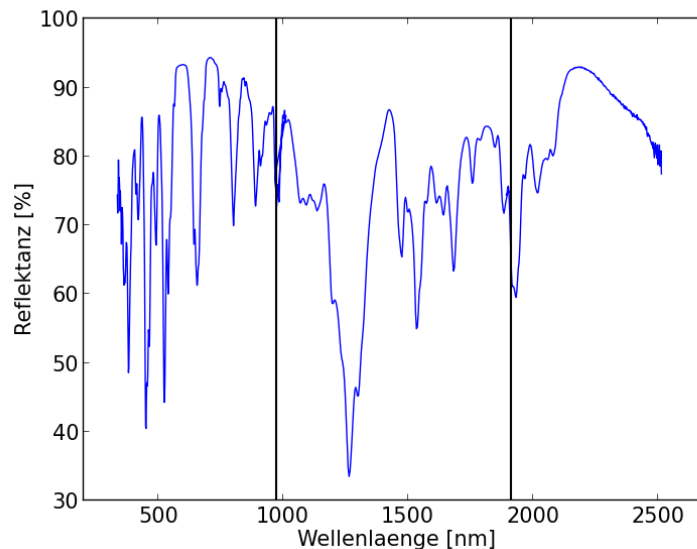


Abbildung 2.8: Spektrum des dotiertem Spektralons

Man misst mit dem SVC HR-1024i ein weißes und ein dotiertes Spektralon unter Verwendung einer Baustellenlampe mit weißem Licht. Die Reflexion ist definiert als die Division der beiden Spektren. Es wird automatisch belichtet. Zu Beginn wurden mehrere Messungen mit gleichbleibendem Aufbau durchgeführt. Danach wird der Winkel bzw. der Abstand zwischen SVC HR-1024i und dem Spektralon verändert. Um den Transport zu simulieren, wurde das SVC HR-1024i aus- und wieder angeschaltet und die gesamte Messung nach ein paar Tagen wiederholt. Dafür wurde zwischenzeitlich auch alles ab- und später wieder aufgebaut. Um Temperaturunterschiede zu simulieren, wurde die Baustellenlampe lange angelassen, da diese den gesamten Aufbau stark erwärmte.

Messergebnis Der Mittelwert der Abweichung liegt bei 0,08 nm und das Maximum bei 0,23 nm, wobei dieser Wert einen Ausreißer darstellt. Da die betrachteten Kurven sehr glatt sind und das SVC HR-1024i eine Antwort-Funktion mit einer Halbwertsbreite von circa 6 nm hat, ist es schwierig noch feiner aufgelöst zu messen. Daher kann man die Abweichung von 0,08 nm vernachlässigen. Im dritten Detektor nehmen die Abweichungen zu, daher sollte in der Zukunft noch eine Lasermessung durchgeführt werden.

SVC HR-1024i Rauschen

Messaufbau Um das Rauschen des SVC HR-1024i zu überprüfen, wurden 1000 Messungen am RASTA durchgeführt. Für diese Messung wurde das SVC HR-1024i seitlich an das RASTA montiert.

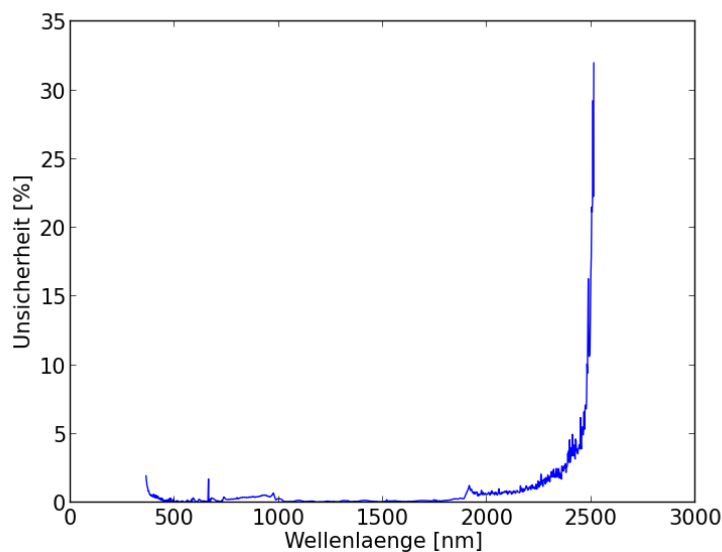


Abbildung 2.9: SVC HR-1024i Rauschen

Messergebnis Beim ersten Detektor wird eine Unsicherheit von 0,6 % gemessen, beim zweiten Detektor sind es nur 0,25 % (siehe Abbildung 2.9). Die Unsicherheiten beim dritten Detektoren gehen bis zu 35 %. Dies ist schlechter als erwartet. Diese großen Unsicherheiten könnten daher kommen, dass in diesem Bereich zu wenig Licht vom RASTA ins SVC HR-1024i gelangt. Daher wird der dritte Detektor bei der gesamten Unsicherheitsberechnung nicht mehr berücksichtigt, da er sich für den Transfer der Kalibrierung nicht eignet um das Ziel zu erreichen.

2.3.3 Ulbrichtkugel

Messaufbau Um zu überprüfen, ob sich mit Positionsänderungen im Messaufbau auch das Signal ändert, wurde das SVC HR-1024i in verschiedenen Winkeln und Abständen über die Ulbrichtkugelöffnung gehalten. In Abbildung 2.10 wird die normierte, relative Abweichung dargestellt. Dabei wurde zweimal senkrecht sowie unter verschiedenen Winkeln nach rechts und links gemessen. Es wurde sowohl mit einem Glasfaserbündel gemessen. Zusätzlich wurde ein Radiometer über die Ulbrichtkugelöffnung montiert, um die Stabilität dieser Lichtquelle zu überprüfen.

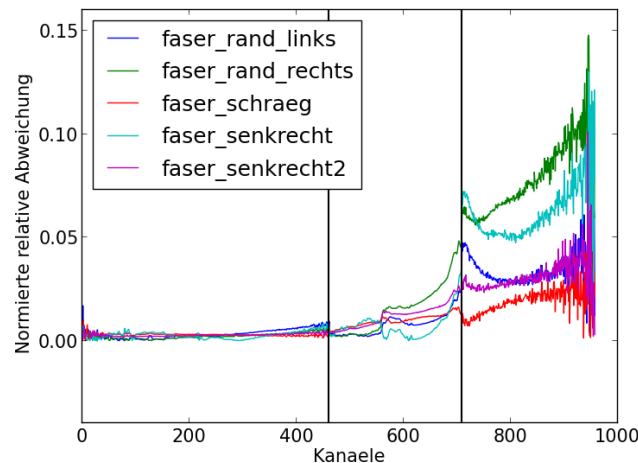


Abbildung 2.10: Winkelabhängigkeit des SVC HR-1024i-Signals an der Ulbrichtkugel

Messergebnis Es ist deutlich zu sehen, dass die relative Abweichung im dritten Detektor sehr groß ist. Der Maximalwert liegt bei 14,5 %. Der Mittelwert jedoch bei 1,57 %. Würde man den dritten Detektor mit einer Wellenlänge von 1910 nm - 2500 nm nicht berücksichtigen, wären die meisten Werte unter 1 %.

Inhomogenität der Ulbrichtkugel

Die Inhomogenität der Ulbrichtkugel wurde bereits gemessen [Bau13]. Dabei kam eine Unsicherheit von 0,67 % heraus.

2.3.4 Radiometer

Radiometer wurden sowohl bei den Messungen am RASTA, als auch bei der Ulbrichtkugel eingesetzt. Sie überprüfen die Stabilität der jeweiligen Lichtquelle. So kann man als Beispiel die Messung des SVC HR-1024i am RASTA betrachten. Hierbei liegt die

Standardabweichung während der Messung bei nur 0,0007 %. Somit werden die Lichtquellen als stabil angesehen.

2.3.5 HySpex-Sensoren

Rauschen der HySpex-Sensoren

Das Rauschen der HySpex-Sensoren wurde bereits vor dieser Arbeit in einer bisher unveröffentlichten Messung überprüft [Len13]. Funktion (2.5) beschreibt das Rauschen der beiden Sensoren. Mit Sigma für die Standardabweichung, S dem Signal und a,b und c für Parameter, welche durch einen Fit bestimmt werden. Für VNIR sind die Werte: a = 0,3499, b = 51,3689, c = 0,5548. Für SWIR: a = 0,1214, b = 6298,7956, c = -1,6382

$$\sigma(S) = a \cdot \sqrt{(S + b)} + c \quad (2.5)$$

2.3.6 Nichtlinearität des HySpex-VNIR

Wie schon in Abschnitt 2.2.2 angedeutet, gibt es bei dem HySpex-VNIR für Signale unter 300 DN eine Nichtlinearität von 5 %.

2.4 Fehlerfortpflanzung

Um die Gesamtunsicherheiten der Messkette zu berechnen, wird die Gaußsche Fehlerfortpflanzung verwendet. Die in dieser Arbeit gemessenen Unsicherheiten der einzelnen Parameter sind die Standardabweichungen der Messunsicherheiten. Die allgemeine Formel der Gaußschen Fehlerfortpflanzung lautet wie folgt:

$$\Delta f(x_0, \dots, x_n) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot \Delta x_k \right)^2} \quad (2.6)$$

$\Delta f(x_0, \dots, x_n)$ steht für die Gesamtunsicherheit der Größe f , wobei (x_0, \dots, x_n) die Parameter darstellen, von welchen f abhängt. Δx_k sind die voneinander unabhängigen Einzelunsicherheiten.

In dieser Messkette wurde die Unsicherheit der radiometrischen Empfindlichkeit wie folgt berechnet, wobei die Integrationszeiten als nicht fehlerbehaftet angesehen wurden:

$$\Delta c_{\text{svc}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial c_{\text{svc}}}{\partial S_{\text{svc-r}}}\right) \cdot \Delta S_{\text{svc-r}}\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial c_{\text{svc}}}{\partial L_{\text{PTB}}}\right) \cdot \Delta L_{\text{PTB}}\right]^2} \quad (2.7)$$

$$\Delta L_{\text{UK}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial L_{\text{UK}}}{\partial c_{\text{svc}}}\right) \cdot \Delta c_{\text{svc}}\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial L_{\text{UK}}}{\partial S_{\text{svc-uk}}}\right) \cdot \Delta S_{\text{svc-uk}}\right]^2} \quad (2.8)$$

$$\Delta c_{\text{hs}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial c_{\text{hs}}}{\partial S_{\text{hs}}}\right) \cdot \Delta S_{\text{hs}}\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial c_{\text{hs}}}{\partial L_{\text{UK}}}\right) \cdot \Delta L_{\text{UK}}\right]^2} \quad (2.9)$$

Das selbe muss natürlich auch für die Variante mit dem HySpex als Transferspektrometer durchgeführt werden.

$S_{\text{svc-r}}$ ist die Unsicherheit des SVC HR-1024i, welche durch das Rauschen des Gerätes entsteht. Die Unsicherheit ΔL_{PTB} wurde von der PTB bestimmt. In $S_{\text{svc-uk}}$ fließt die unveröffentlichte Unsicherheit und die berechnete Winkelabhängigkeit mit ein. In ΔS_{hs} fließt das Rauschen der HySpex-Sensoren ein.

Die Unsicherheit bei der Stabilität der Lichtquellen kann vernachlässigt werden.

2.5 Radiometrische Empfindlichkeit mit Unsicherheiten

2.5.1 SVC HR-1024i als Transferspektrometer

In Abbildung 2.11 wird durch die rote Kurve die radiometrische Empfindlichkeit dargestellt, wenn man das SVC HR-1024i als Transferspektrometer verwendet, um den HySpex-VNIR zu kalibrieren. Die blaue Kurve steht für die angetragenen Unsicherheiten und die gestrichelte Kurve für die einhüllende Funktion der Unsicherheitskurve. Die einhüllende Kurve vernachlässigt kleinere Schwankungen in der Unsicherheitskurve und vereinfacht somit deren Darstellung.

Auffallend ist, dass die Unsicherheitskurve bei Werten kleiner 430 nm und größer 950 nm sprunghaft von 1 % auf circa 5 % ansteigt. Ab circa 975 nm steigt die Unsicherheit auf 7 % an. Dies liegt an der Nichtlinearität des HySpex-VNIR.

2.5.2 HySpex-Sensoren als Transferspektrometer

Wie in Abschnitt 2.5.1 zeigt in den Abbildungen 2.12 und 2.14 die rote Kurve die radiometrische Empfindlichkeit und die blaue Kurve die Unsicherheit an.

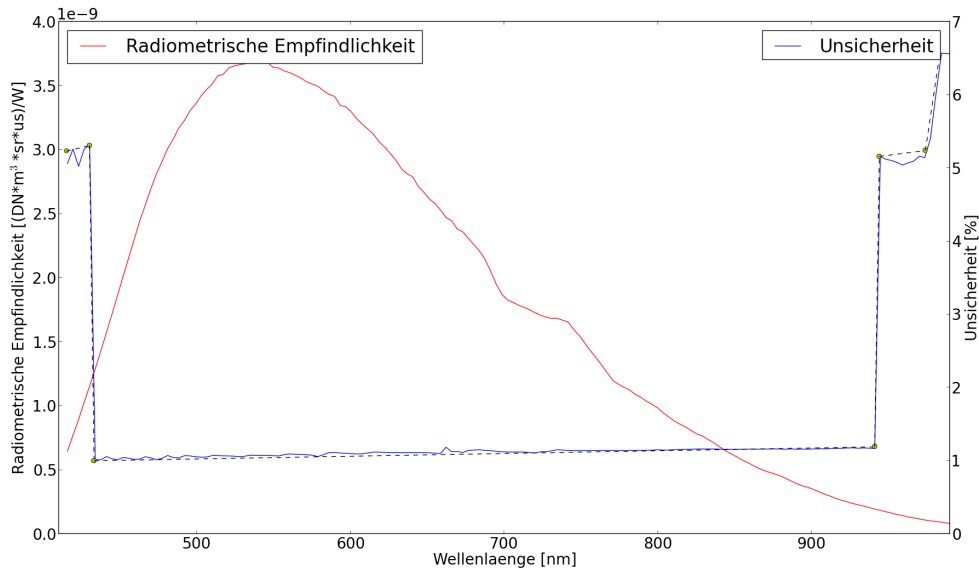


Abbildung 2.11: SVC HR-1024i als Transferspektrometer und HySpex-VNIR: Radiometrische Empfindlichkeit mit angetragener Unsicherheit

Wobei in Abbildung 2.12 das Zentralpixel des HySpex-VNIR als Transferspektrometer zur Kalibrierung des HySpex-VNIR verwendet wurde. Auch hier fällt der sprunghafte Anstieg der Unsicherheiten auf, welcher wiederum auf die Nichtlinearität des HySpex-VNIR zurückzuführen ist. Die maximale Unsicherheit liegt bei 5%. Abbildung 2.13 zeigt die prozentuale Abweichung der beiden radiometrischen Empfindlichkeiten des HySpex-VNIR, welche in den Abbildungen 2.11 und 2.12 dargestellt sind. Die maximale Abweichung von 6 % liegt im Rahmen der angegebenen Unsicherheiten.

In Abbildung 2.14 wurde das Zentralpixel des HySpex-SWIR als Transferspektrometer verwendet um das HySpex-SWIR zu kalibrieren. Ab 1700 nm steigen die Unsicherheiten auf bis zu 8% an. Dies liegt an der von der PTB gemessenen Unsicherheit des RASTA. Die Atmosphäre des Labors beeinflusst die radiometrische Empfindlichkeit. Bei der Verwendung des Zentralpixels des HySpex-SWIR für die Kalibrierung des selben, gibt es daher in der Kurve der radiometrischen Empfindlichkeit deutlich sichtbare Einschnitte bei circa 1400 nm und 1900 nm, welche mit einem grünen Kreis markiert wurden. Außerhalb des Labors sind diese Einschnitte noch viel größer, daher kann man in diesen Spektralbereichen keine Fernerkundung betreiben.

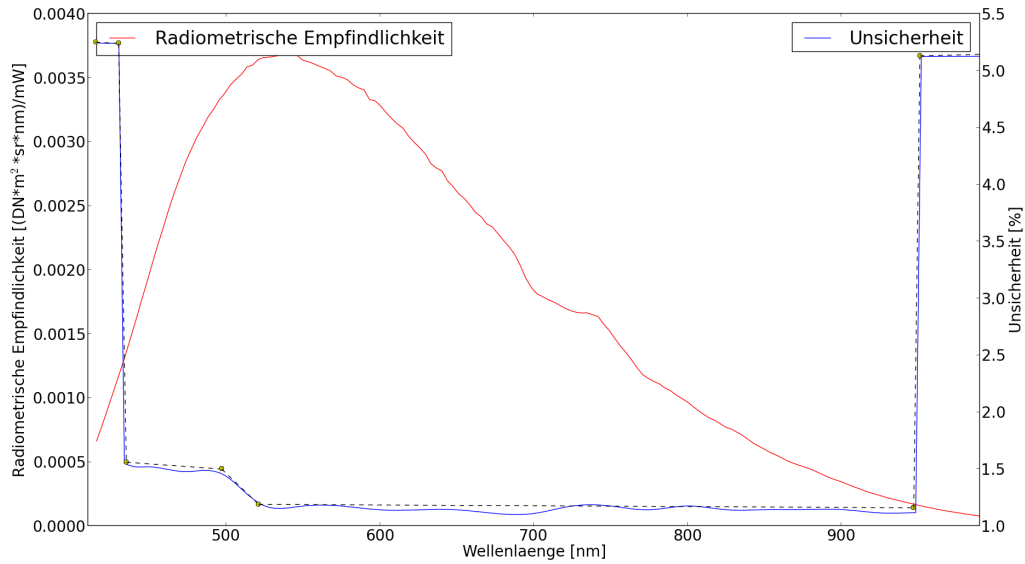


Abbildung 2.12: HySpex-VNIR mit zweifach spinning: Radiometrische Empfindlichkeit mit angetragener Unsicherheit

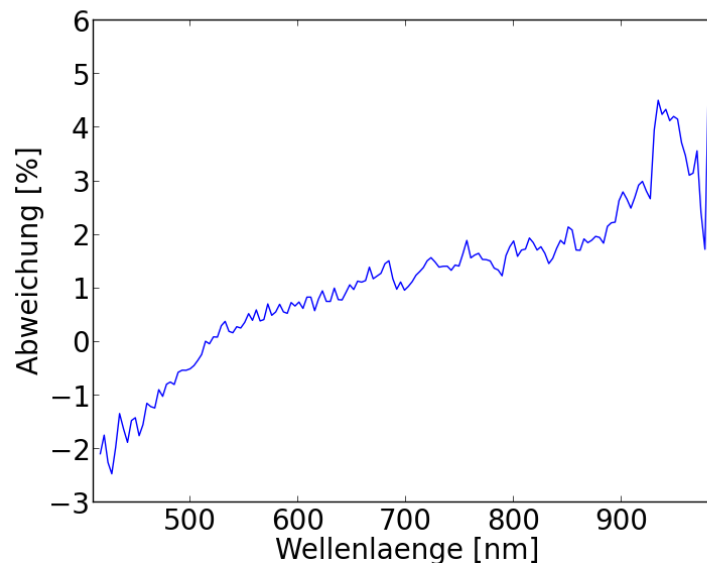


Abbildung 2.13: Abweichung der gemessenen radiometrischen Empfindlichkeit des HySpex-VNIR der beiden Transfermethoden

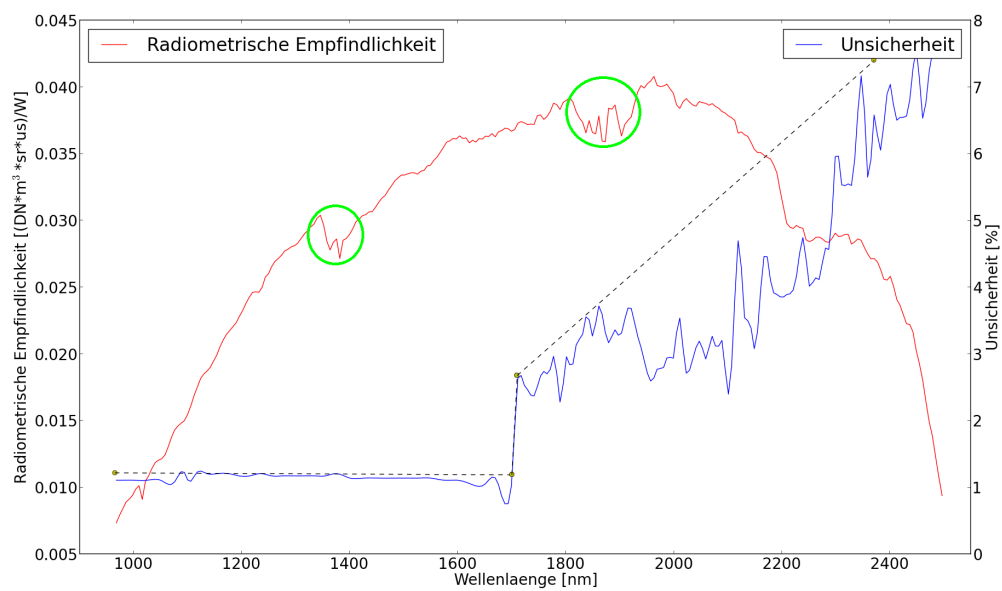


Abbildung 2.14: HySpex-SWIR: Radiometrische Empfindlichkeit mit angetragener Unsicherheit

Kapitel 3

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, an Hand eines Strahldichtenormals einen Hyperspektralsensor radiometrisch zu kalibrieren und die Messunsicherheiten zu bestimmen. Dazu muss die Kalibrierung von dem Normal, RASTA, zu einer zweiten Strahldichtequelle übertragen werden.

Dafür wurden drei Transferspektrometer verwendet, das SVC HR-1024i und die HySpex-Sensoren. Da das SVC HR-1024i leicht transportabel und immer im Institut vor Ort ist, ist diese Transfermethode für Wellenlängen bis 1900 nm besser geeignet. Außerdem können nicht alle Geräte am RASTA direkt kalibriert werden.

Bei der Auswertung der radiometrischen Empfindlichkeit des HySpex-VNIR fiel bei beiden Transferverfahren auf, dass durch dessen Nichtlinearität bei Werten kleiner 550 nm und größer 950 nm die Unsicherheiten sprunghaft von ca 1 % auf 5 % bis 7 % ansteigen. Bei den beiden Transfermethoden zur Berechnung der radiometrischen Empfindlichkeiten des HySpex-VNIR liegt die prozentuale Abweichung bei maximal 6 % und damit im Rahmen der angegebenen Unsicherheiten.

Die Atmosphäre des Labors beeinflusst die Messung der radiometrischen Empfindlichkeit. Bei der Kurve der radiometrischen Empfindlichkeit des HySpex-SWIR gibt es daher deutlich sichtbare Einschnitte. Des Weiteren steigt die Unsicherheit ab 1700 nm von circa 1 % auf 8 % an. Dies liegt an der von der PTB gemessenen Unsicherheit des RASTA.

Leider kam es jedoch bei dem Transfer mit Hilfe des SVC HR-1024i zu einigen Unklarheiten, weshalb weitere Arbeiten in dieser Richtung angebracht wäre:

- radiometrische Empfindlichkeit des SVC HR-1024i erneut vermessen
- Wiederholung der SVC HR-1024i-Messung an der Ulbrichtkugel. Dadurch bekommt man die Strahldichte der Ulbrichtkugel und kann klären, warum die Strahldichtemessung mit dem SVC HR-1024 und dem SVC HR-1024i variiert.

- Überprüfung der spektralen Kalibrierung des dritten Dektors des SVC HR-1024i mit Hilfe eines Lasers oder Monochromators
- Drift vom SVC HR-1024i bestimmen

Wenn alle Unsicherheiten und Transfermethoden komplett bestimmt sind, muss noch eine Kalibriersoftware geschrieben werden.

Mit dem SVC HR-1024 gelang es, die radiometrische Empfindlichkeit der HySpex-Sensoren zu bestimmen. Für die radiometrische Empfindlichkeit des HySpex-SWIR konnte dies bisher nicht mit dem SVC HR-1024i bestätigt werden.

Des weiteren wurden die Unsicherheiten für beide Transfermethoden bestimmt und mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung miteinander verrechnet. Dadurch hat man eine mit bekannten Unsicherheiten behaftete radiometrische Empfindlichkeit der HySpex-Sensoren und, wenn die noch ausstehenden Überprüfungen durchgeführt wurden, kann man Hyperspektralsensoren in der CHB radiometrisch rückführbar zu der Primärnormalen der PTB kalibrieren.

Literaturverzeichnis

- [ADI13] Adimec Electronic imaging, *Black Level and Analog Gain A1600m/D*, Application Note (2013)
- [APE13] http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-3228/5011_read-18560/, zugegriffen am 30.06.2013
- [Bau10] A. Baumgartner, *Erfassung und Korrektur von geometrischen und spektralen Abbildungsfehlern abbildender Spektrometer*, Masterarbeit an der Hochschule Deggendorf (2010)
- [Bau13] A. Baumgartner, persönliche Kommunikation
- [Cal09] P. Gege, J. Fries, P. Haschberger, P. Schoetz, H. Schwarzer, P. Strobl, B. Suhr, G. Ulbrich, W.J. Vreeling, *Calibration facility for airborne imaging spectrometers*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 (2009), p.387-397
- [Con10] P. Gege, J. Fries, P. Haschberger, P. Schoetz, H. Schwarzer, T. Schwarzmaier, *Concept for improved radiometric calibration of radiance sources at the CHB facility*, CD-ROM, Seiten 1-7, ESA Communications, Hyperspectral Workshop 2010, 17.-19. März 2010, Frascati, Italien, ISBN 978-92-9221-247-6. ISSN 1609-042X (2010)
- [Imf13] http://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-5279/8913_read-16239/, zugegriffen am 28.05.2013
- [Koi13] http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-3487/5375_read-8040/, zugegriffen am 04.06.2013
- [Len13] K. Lenhard, persönliche Kommunikation
- [Nor08] Norsk Elektro Optikk AS, *HySpex Hyperspektral Cameras, An Overview*, Online (2008), Available: <http://www.neo.no/hyspex/>, (2013, April 5).
- [Nor10] Norsk Elektro Optikk AS, *HySpex, Imaging Spectrometer*, Users Manual (2010)

- [PTB11] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Kalibrierschein*, (2011)
- [Rel97] Henry J. Kostkowski, *Reliable Spectroradiometry*, Spectroradiometry Consulting, (1997)
- [Sch12] T. Schwarzmaier, A. Baumgartner, P. Gege, C. Koehler, K. Lenhard, *DLR's New Traceable Radiance Standard "RASTA"*, IGARSS 2012, (2012)
- [SVC12] Spectra Vista Corporation, *SVC HR-1024i / SVC HR-768i*, User Manual (2012)
- [Unc01] Stephanie Bell, *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*, Measurement Good Practice Guide, (2001)

Danksagung

Zum Schluss möchte ich noch allen danken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Ein Dankeschön an Herrn Prof. Dr. Heiner Igel, welcher bereitwillig die Betreuung meiner externen Arbeit übernommen hat.

Vielen Dank an Herrn Dr. Ing. Peter Haschberger und der gesamten Abteilung des IMF-ExV für die gute Zusammenarbeit und die lehrreiche Zeit.

Besonderen Dank an meinen Betreuer Karim Lenhard, der mir während der gesamten Arbeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Und zum Abschluss noch einen großen Dank an meine Eltern, welche immer hinter mir standen und mir das Studieren erst ermöglicht haben und an meinen Freund Christian.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtliche oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.